

## POTENSI PANAS GAS BUANG DAN LAJU PASOKAN BAHAN BAKAR ALAT PENGERING KOPI TANDEM HIBRID PANAS MATAHARI-BIOMASSA

### *Heat Potential of Flue Gas and Fuel Supply Rate of Tandem Hybrid Solar- Biomass Dryer for Coffee*

Yuwana\*, Bosman Sidebang

Jurusan Teknologi Pertanian - Fakultas Pertanian - Universitas Bengkulu  
Jalan WR. Supratman, Bengkulu 38371  
Penulis Korespondensi, email : yuwana@unib.ac.id

Disubmit : 14 Juni 2023

Direvisi : 17 Desember 2023

Diterima : 13 April 2024

#### ABSTRAK

Alat pengering tandem hibrid panas matahari-biomassa dikembangkan dari alat pengering sebelumnya dengan memanfaatkan gas buang yang dihasilkan sebagai sumber panas sehingga kapasitasnya meningkat dari sekitar 2 ton menjadi 4 ton buah kopi. Tujuan penelitian ini menentukan potensi panas gas buang dari tungku dan pengaruh laju pasokan bahan bakar pada suhu maksimum ruang pengering belakang. Dioperasikan dengan pasokan bahan bakar LPG 1,4–4,35 kg/jam selama 2 jam, suhu udara di kedua ruang pengering tetap lebih tinggi dibandingkan suhu udara luar dari 7,3 jam hingga 14 jam, sementara ruang pengering depan mempunyai suhu udara 36,5–50,1°C dengan kecepatan maksimum antara 0,8–1,4 m/s dan ruang pengering belakang mempunyai suhu 39–108°C dengan kecepatan maksimum 1,15–1,6 m/s. Entalpi udara pengering di ruang pengering belakang secara konsisten lebih tinggi dari ruang pengering depan. Dengan peningkatan pasokan LPG, persentase panas kumulatif yang didistribusikan di ruang pengering belakang meningkat dari 19% menjadi 32% sedangkan potensi panasnya meningkat dari 51,8% menjadi 58,5% dari nilai kalor LPG yang dipasok dan didistribusikan 42,5% menjadi 47,7% di ruang pengering depan dan 4,8% sampai 16% di ruang pengering belakang. Dioperasikan dengan suplai bahan bakar kayu bakar 2,5–15 kg, suhu udara pengeringan maksimum dan lamanya api bertahan membara (waktu pembakaran) meningkat secara linier dengan besarnya suplai kayu bakar. Suplai kayu bakar sebanyak 3,54–12,69 kg ke dalam tungku menghasilkan suhu udara ruang pengering belakang setara dengan berbagai suhu udara alat pengering kopi baik non mekanis maupun mekanis.

Kata kunci: Entalpi; Kecepatan; Panas Kumulatif; Pasokan Bahan Bakar; Suhu

#### ABSTRACT

*The solar-biomass hybrid tandem dryer was developed from the previous dryer by utilizing the exhaust gas so that its capacity increased from around 2 tons to 4 tons of coffee cherries. This research aimed to determine the flue gas heat potential and the effect of fuel supply on the maximum temperature of the rear drying chamber. Operated with a supply of LPG fuel of 1.4–4.35 kg/hour for 2 hours, the temperature in two drying chambers was higher than the outside from 7.3 hours to 14 hours, while the front drying chamber temperature was 36.5–50.1°C with a maximum velocity between 0.8–1.4 m/s and the rear drying chamber temperature was 39–108°C with a maximum velocity of 1.15–1.6 m/s. Increasing LPG supply, the cumulative heat distributed in the rear drying chamber increased from 19% to 32%. In comparison, the potential heat increased from 51.8% to 58.5% of the supplied calorific value and distributed LPG from 42.5% to 47.7% in the front drying chamber and 4.8% to 16% in the rear drying chamber. Operated with a fuel supply of 2.5–15 kg of firewood, the maximum drying air temperature and the length of time the fire lasts (burning time) increased linearly with the amount of fuel wood supplied. A firewood supply of 3.54–12.69 kg into the furnace produced an air temperature in the rear drying chamber equivalent to various air temperatures of coffee dryers, both non-mechanical and mechanical.*

Keywords: Cumulative Heat; Enthalpy; Fuel Supply; Temperature; Velocity

## PENDAHULUAN

Kopi merupakan komoditas penting dalam perekonomian Indonesia. Rata-rata produksi kopi di Indonesia mencapai 600.000 ton per tahun, dihasilkan dari 1,3 juta hektar areal perkebunan dan 90% biji kopi berasal dari perkebunan rakyat. Biji kopi dapat diperoleh dari buah kopi melalui proses kering, basah (*full washed*), dan semi basah (*semi washed*), namun sebagian besar petani mengolah buah kopinya dengan menggunakan proses kering. Dengan proses pengeringan kering menggunakan sinar matahari dibutuhkan waktu 2-3 minggu untuk mendapatkan biji kopi dengan kadar air maksimal 12,5% yang ditentukan untuk kualitas biji kopi Indonesia. Pengeringan di bawah sinar matahari atau penjemuran biasanya dilakukan dengan menebarkan buah kopi di berbagai permukaan. Pengeringan ini ditandai dengan boros tempat (Prakash dan Satyanayarana, 2014), ancaman penurunan kualitas produk, dan kontaminasi benda asing yang tidak diinginkan (Panchal *et al.*, 2013, Sontakke dan Salve, 2015). Untuk mengatasi masalah yang dihadapi oleh penjemuran, pengeringan surya diperkenalkan dan berbagai model pengering telah diujicobakan. Berdasarkan manipulasi panasnya, pengering surya dapat dikelompokkan menjadi tipe langsung (Olokor dan Omojowo, 2009, Arun *et al.*, 2014) tipe tidak langsung (Nandwani, 2011, Banout dan Ehl, 2010, Parikh dan Agrawal, 2011, Sulaiman *et al.*, 2013, Nguyen *et al.*, 2013, Acar *et al.*, 2020) dan tipe campuran (Azimi *et al.*, 2012, Munir *et al.*, 2013, Aziz *et al.*, 2016). Menurut pengiraman udara panas ke pengering, dapat dikategorikan sebagai pengering surya pasif (Olokor dan Omojowo, 2009, Nandwani, 2011, Sulaiman *et al.*, 2013, Aziz *et al.*, 2016) dan pengering surya aktif (Almuhana, 2012, Arun *et al.*, 2014, Banout dan Ehl, 2010, Parikh dan Agrawal, 2011, Acar *et al.*, 2020, Azimi *et al.*, 2012, Munir *et al.*, 2013).

Peluang untuk meningkatkan kinerja sistem pengeringan surya telah ditempuh dengan memanfaatkan temuan terbaru tentang pelacakan letak matahari (Nguyen dan Bui, 2016, Grigoriev *et al.*, 2020, Rasmussen, 2020), peramalan awan dan

langit cerah (Munkhammar *et al.*, 2019, Jarvela *et al.*, 2020, Matsunobu *et al.*, 2021), peramalan, pengukuran, dan manipulasi radiasi matahari (Anuwar dan Omar, 2016, Abdullah dan Aziz, 2020, Urraca *et al.*, 2020, Qin *et al.*, 2021, Wang *et al.*, 2022, Tschopp *et al.*, 2022, Lorenz *et al.*, 2022), kolektor surya (Abuska dan Sevik, 2017, Kishk *et al.*, 2019, Al-Damook *et al.*, 2019, Murali *et al.*, 2020, Quitiaquez *et al.*, 2021, Arya *et al.*, 2021, Cabral *et al.*, 2021), penukar panas (Montes *et al.*, 2020, Too *et al.*, 2021), dan penyimpanan panas (Osei *et al.*, 2021). Meskipun beberapa pengering surya telah dilengkapi dengan penyimpanan panas, namun pengering surya masih terhambat oleh ketergantungannya pada sumber panas dari matahari. Untuk mengatasi kelemahan ini, pengering hibrid diperkenalkan. Pengering hibrid beroperasi dengan panas dari matahari dan sumber panas lainnya, seperti panas yang dihasilkan oleh pemanas listrik (Ferreira *et al.*, 2007, Rodriguez *et al.*, 2013), panas dari pembakaran biomassa (Thanaraj *et al.*, 2004, Gunasekaran *et al.*, 2012, Saravanan *et al.*, 2014, Dhanushkodi *et al.*, 2015, Yuwana and Sidebang, 2017), dan panas yang dihasilkan oleh perangkat microwave (Kusmiyati dan Fuholi, 2021). Kebanyakan pengering kategori ini memerlukan listrik, untuk sirkulasi udara pengering (Dhanuskodi *et al.*, 2013, Rayes *et al.*, 2014) atau sebagai sumber panas (Maia *et al.*, 2012, Sajith dan Muraleedharan, 2013, Mortezapour *et al.*, 2014, Sajith dan Muraleedharan, 2014). Pada kasus pengeringan kopi, beberapa pengering telah dieksplorasi, seperti pengering surya rumah kaca oleh Widyotomo (2014), pengering surya box yang dilengkapi dengan kipas angin oleh Gachen *et al.* (2020), pengering surya hibrid tipe box yang dilengkapi dengan alat penukar panas, turbin ventilator, dan blower oleh Agustina *et al.* (2016) dan Syah *et al.* (2016), pengering kabinet hibrid energi surya yang dilengkapi dengan turbin ventilator dan pemanas gas oleh Suherman *et al.* (2020). Alat pengering Widyotomo memiliki panjang 24 m, lebar 18 m, dan tinggi atap depan 3 m dan belakang 2 m, dengan kapasitas maksimal 40 ton kopi segar, menghasilkan suhu ruang pengering maksimal 52°C dan mampu menurunkan

kadar air buah kopi dengan hamparan 30 kg/m<sup>2</sup>, 60 kg/m<sup>2</sup> dan 90 kg/m<sup>2</sup> dari 58–64% menjadi 12% selama 6–14 hari. Alat pengering Gachen memiliki luas kolektor panas 1,11 m<sup>2</sup>, ruang pengering 1,11 m<sup>2</sup>, tinggi 1,52 m, dan bekerja dengan suhu udara pengering rata-rata 40°C mampu mengeringkan perkamen kopi 50 kg/m<sup>2</sup> dari kadar air 55% hingga 11% dalam 4 hari. Alat pengering Agustina dan alat pengering Syah memiliki tinggi total 2,365 m, ruang pengering dengan dimensi 1 m x 1 m x 0,36 m, kotak pengering berukuran 0,93 m x 0,93 m x 0,29 m, ruang plenum berukuran 1 m x 1 m x 0,28 m, dan kolektor panas berukuran 1,2 m x 1 m x 0,27 m. Beroperasi dengan panas matahari, tanpa beban (tanpa biji kopi basah), ruang pengering memiliki suhu 36,2–48,6°C dan kelembaban relatif 43,6–72,6%. Dioperasikan dengan panas matahari dan panas pembakaran sekam kopi untuk pengeringan biji kopi, hasil percobaannya menunjukkan bahwa suhu maksimum 53–55°C dan kadar air biji kopi menurun dari 48,2–48,7% menjadi 11,40–11,66% dalam waktu 21–23 jam. Alat pengering hibrid Suherman terdiri dari kolektor panas dengan luas 1 m<sup>2</sup>, tumpuan 1,01 m x 0,6 m x 0,52 m, rak 4 tingkat dengan ukuran 1 m x 0,6 m x 0,94 m, turbin ventilator dengan diameter 0,36 dan 0,4 m tinggi dan kompor LPG, dan dioperasikan dengan pengaturan suhu 40, 50 dan 60°C. Pengujian yang dilakukan dengan memuat 4 rak masing-masing berisi 300 g biji kopi dengan sumber panas matahari dan panas pembakaran LPG menunjukkan bahwa kadar air biji kopi menurun dari 54,23% menjadi kurang dari 12% dalam waktu 14 jam. Direktorat Jenderal Perkebunan Kementerian Pertanian Republik Indonesia menetapkan suhu 90–100°C dalam waktu 20–24 jam untuk sistem pengeringan mekanis kopi Robusta untuk mendapatkan biji kopi dengan kadar 12,5 % (Mentan. RI, 2012). Hasil percobaan beberapa alat pengering kopi di atas menunjukkan bahwa alat pengering tenaga surya hibrid mampu bekerja dengan cukup baik namun membutuhkan listrik untuk beroperasi. Pada beberapa pengering hibrid, listrik diperlukan untuk menggantikan energi pengeringan (Maia *et al*, 2012, Sajith dan

Muraleedharan, 2013, Mortezapour *et al.*, 2014, Sajith dan Muraleedharan, 2014) atau untuk mensirkulasikan udara pengering (Dhanuskodi *et al.*, 2013, Rayes *et al.*, 2014).

Ketergantungan terhadap listrik inilah yang menjadi kendala utama pengoperasian pengering hibrid di daerah terpencil. Pengering hibrid surya-biomassa juga menderita kehilangan panas melalui gas buang dari tungku. Sebagai salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut, pada penelitian sebelumnya telah dikembangkan alat pengering hibrid surya-biomassa bebas listrik dengan kapasitas sekitar 2 ton buah kopi segar. Ketika dioperasikan dengan panas kayu bakar, alat pengering ini dapat menurunkan kopi ceri segar dengan ketebalan hamparan 4–16 cm dari kadar air 65,23% menjadi 12% dalam waktu 30,82–62,02 jam dengan konsumsi kayu bakar 0,34–0,71 kg per kg kopi ceri basah.

Pada penelitian ini, pengering tersebut dikembangkan lebih lanjut menjadi pengering tandem hibrid surya-biomassa yang terdiri dari dua ruang pengering (depan dan belakang) sehingga kapasitasnya menjadi dua kali lipat dengan memanfaatkan gas buang dari cerobong asap tungku. Ruang pengering depan adalah bebas asap dan dikhususkan untuk pengeringan biji kopi yang diproses secara basah dan semi-basah, sedangkan ruang pengering belakang ditujukan untuk pengeringan buah kopi ceri (proses kering) dengan variasi suhu mulai dari pengering tradisional hingga pengeringan mekanis. Penelitian pendahuluan menunjukkan bahwa penggunaan panas gas buang tidak berakibat negatif pada biji kopi kering hasil pengeringan karena daging dan kulit buah yang masih melekat pada biji kopi mampu melindungi biji kopi tersebut dari gas berbahaya.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi distribusi panas di kedua ruang pengering dari aspek suhu, kecepatan udara kering, entalpi, panas kumulatif, dan potensi panas, dan untuk menemukan hubungan antara laju pasokan biomassa dengan suhu maksimum ruang pengering belakang dan lamanya api nyala (waktu dari bahan bakar mulai menyala

sampai habis terbakar) untuk mengakomodasi variasi suhu udara pengering yang digunakan dalam sistem pengeringan kopi.

## METODE

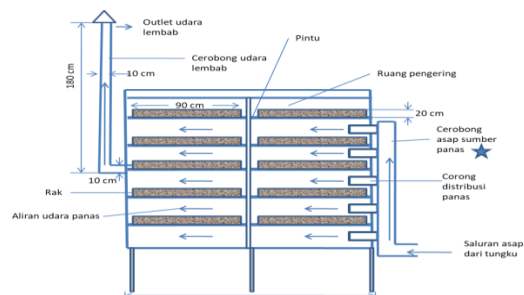
Alat utama yang dipakai pada penelitian ini adalah alat pengering hibrid energi surya-biomassa yang terdiri dari dua unit ruang pengering yakni ruang pengering depan (sudah ada sebelumnya) dan ruang pengering belakang yakni hasil modifikasi sedangkan alat penunjang penelitian adalah kompor gas yang dirancang khusus yang dilengkapi dengan regulator untuk dapat diatur dari jauh, termometer digital dan anemometer digital. Seluruh struktur ruang pengering depan ditutup kaca bening 4, berlantai semen dan dilengkapi dengan kolektor panas, cerobong depan, terowongan gas buang, rak pengering, penukar panas, tungku dan saluran udara. Kolektor panas terbuat dari seng gelombang dicat hitam pada permukaan atas dan dilapisi dengan isolator panas berupa kertas koran bekas yang diletakkan di atas papan triplek pada permukaan bawah. Cerobong depan terbuat dari rangka besi dan dinding serta atap seng datar. Rak pengering terbuat kawat nilon tahan karat yang dibingkai dengan rangka *hollow* galvanis. Penukar panas berujud bejana berongga yang dilengkapi dengan 40 buah sirip yang diisi air sebagai penyimpan panas. Tungku terbuat dari semen bertulang besi dilengkapi terowongan gas buang terbuat dari besi *hollow* pada ujung belakang, lambung penukar panas bersaluran udara terbuat *hollow* galvanis pada dinding, 8 lubang ventilasi pada dinding dan pintu bahan bakar pada ujung depan. Ruang pengering belakang dibuat dari rangka besi *hollow* galvanis dan ditutup seng plat datar yang dilapisi triplek isolator panas pada lantai, dinding dan atap. Ruang pengering ini dilengkapi dengan saluran gas buang yang terhubung dengan terowongan gas buang, tiga cerobong belakang terbuat dari plat aluminium, rak pengering yang terbuat dari bahan yang sama dengan rak ruang pengering depan, dan pintu yang terbuat dari bahan yang sama dengan

dindingnya. Bahan penelitian meliputi gas LPG dan kayu bakar berupa kayu karet hasil peremajaan kebun karet.

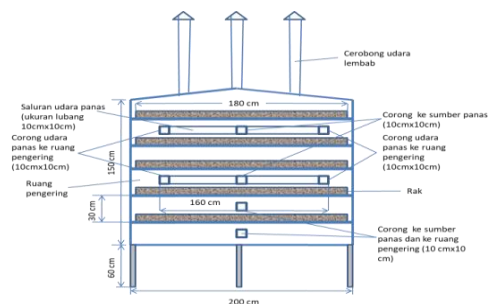
Kegiatan penelitian meliputi modifikasi cerobong gas buang dan perancangan ruang pengering belakang kemudian menguji alat pengering tanpa muatan buah kopi. Alat pengering sebelum modifikasi ditunjukkan pada Gambar 1 sedangkan struktur unit pengering belakang disajikan secara skematis pada Gambar 2 dan 3.



Gambar 1. Alat Pengering Sebelumnya (1- Kolektor, 2-Ruang Pengeringan, 3- Cerobong Depan, 4-Terowongan Gas Buang, 5-Rak, 6-Penukar Panas, 7-Tungku, 8-Saluran Udara, 9-Inlet Udara, 10- Outlet Udara)



Gambar 2. Ruang Pengering Belakang (tampak samping)



Gambar 3. Ruang Pengering Belakang (Tampak Depan)

Unit pengering depan meliputi ruang pengering, penyimpanan/penukar panas, cerobong depan, tungku, 2 lambung udara dinding tungku, 2 pengumpul panas surya, saluran gas buang, 10 rak (disusun dalam 5 tingkat), dan pintu ruang pengering. Ruang pengering berisi alat penukar panas yang berisi air, berfungsi untuk menyimpan panas yang diserap dari tungku untuk selanjutnya ditransfer secara konveksi ke udara pengering dalam ruang pengering. Cerobong depan digunakan untuk mengeluarkan udara lembab dari ruang pengering. Tungku berfungsi sebagai tempat pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan panas. Lambung udara tungku berfungsi untuk menyerap panas dari dinding tungku yang kemudian digunakan untuk memanaskan udara di dalamnya dan mengalirkannya ke ruang pengering. Kolektor panas berfungsi untuk mengumpulkan panas matahari untuk kemudian dialirkannya ke ruang pengering. Saluran gas buang berfungsi untuk memudahkan proses pembakaran bahan bakar di dalam tungku. Rak berfungsi sebagai tempat kopi basah untuk dikeringkan. Pintu ruang pengering memfasilitasi pergerakan rak keluar-masuk ruang pengering.

Unit pengering belakang terdiri dari ruang pengering, 3 cerobong asap, 10 rak (disusun 5 tingkat), corong dan saluran gas buang, dan pintu ruang pengering. Selama pengoperasian, saluran gas buang memasok panas ke dalam ruang pengering belakang. Selanjutnya, aliran gas ini menjadi sumber udara panas yang melewati rak berisi produk yang dikeringkan dan akhirnya meninggalkan ruang pengering belakang melalui cerobong ruang pengering belakang.

Bekerja dengan panas pembakaran bahan bakar, pengering dioperasikan dengan membuka pintu tungku, menempatkan bahan bakar dengan jumlah yang ditentukan di dalamnya, dan menyalakannya. Pintu tungku dibiarkan terbuka untuk memantau nyala api. Ketika bahan bakar sudah terbakar dengan baik, pintu tungku ditutup, dan pasokan udara segar ke dalam tungku terjadi melalui rongga ventilasi pada dinding tungku.

Panas dari pembakaran bahan bakar diserap oleh alas penukar panas, disimpan air di dalamnya, dan kemudian dipindahkan ke seluruh dinding struktur penukar panas ke ruang pengering depan. Panas yang dilepaskan ini digunakan untuk memanaskan udara panas yang dipasok dari plenum kolektor panas. Secara bersamaan, lambung udara tungku juga menyerap panas untuk memanaskan udara di dalamnya yang kemudian dialirkan ke ruang pengering depan. Aliran udara panas ke ruang pengering depan diikuti dengan masuknya udara segar lewat inlet ke dalam kolektor panas yang selanjutnya mengalami proses pemanasan yang sama sehingga menciptakan aliran udara panas yang terus menerus ke dalam ruang pengering selama pembakaran bahan bakar dalam tungku berlangsung. Udara panas di ruang pengering depan memanaskan kopi basah yang sudah diletakkan pada rak pengering untuk menguapkan kandungan airnya. Selanjutnya, udara lembab dikeluarkan dari ruang pengering melalui cerobong depan. Ketika panas dalam tungku habis, penukar panas menghantarkan kembali panas yang tersimpan ke udara di dalam tungku. Udara hangat ini mengalir ke ruang pengering belakang untuk mempertahankan suhu udara di dalamnya.

Gas buang yang keluar dari cerobong asap menjadi sumber panas untuk memanaskan udara dalam ruang pengering belakang. Udara panas ini digunakan untuk menguapkan air dari kopi ceri basah yang sedang dikeringkan di ruang pengering belakang, selanjutnya udara lembab dikeluarkan melalui cerobong ruang pengering belakang.

Pada penelitian ini dilakukan dua rangkaian percobaan yaitu pengoperasian alat pengering dengan bahan bakar LPG menggunakan kompor gas dengan 3 pengaturan pasokan gas yaitu P1, P2, dan P3 yang setara dengan pasokan bahan bakar 1,4 kg/jam, 2,3 kg/jam, dan 4,35 kg/jam, dan pengoperasian alat pengering dengan kayu bakar dengan pasokan 2,5 kg, 5 kg, 7,5 kg, 10 kg, 12,5 kg dan 15 kg. Percobaan pertama diulang sebanyak 5 sementara percobaan kedua dilakukan 4 kali ulangan, dan hasil pengukuran suhunya masing-masing

dirata-rata. Penggunaan bahan bakar LPG dilakukan untuk memudahkan pengendalian pasokan bahan bakar dan proses penghitungan panas yang dihasilkan. LPG kemasan tabung 12 kg dengan nilai kalor sebesar 47,271 MJ/kg (Dirjenmigas, 2011). Kayu karet dengan kadar air  $8,2 \pm 0,5\%$  potongan panjang 60 cm dan dibelah menjadi ukuran sekitar 4 cm x 4 cm yang sudah diukur nilai kalornya yakni sebesar 17,58 MJ/kg digunakan sebagai sumber bahan bakar tungku dalam percobaan.

Kompur gas dengan desain khusus yang dilengkapi dengan regulator dan tabung LPG yang dapat dikendalikan dari luar tungku digunakan dalam percobaan pertama. Variasi suplai LPG dilakukan dengan mengatur regulator dan menyalakan kompor selama 2 jam. Pasokan LPG dihitung dengan menimbang tabung LPG sebelum dan sesudah percobaan berjalan. Pada percobaan kedua, perapian digunakan sebagai tempat untuk menyalakan kayu bakar di dalam tungku. Lama nyala api (waktu pembakaran) diukur mulai dari bahan bakar dinyalakan dalam tungku sampai api padam.

Sebelum percobaan dimulai, alat pengering dinaungi dengan terpal UV berwarna gelap (hijau) untuk menghindari pengaruh panas matahari. Termometer digital (model TMP-10) dengan resolusi  $0,1^\circ\text{C}$  disediakan untuk mengukur suhu udara pengering di ruang pengering depan dan belakang, anemometer digital (Hold Peak Model 866B) dengan resolusi  $0,1 \text{ m/s}$  digunakan untuk mengukur kecepatan udara di cerobong depan dan belakang, dan stopwatch digunakan untuk mengukur waktu pembakaran kayu bakar pada percobaan seri kedua. Sepuluh unit termometer dipasang di ruang pengering depan, dengan 5 sensor suhu ditempatkan di rak kanan (1 sensor untuk setiap tingkat rak) dan 5 sensor suhu ditempatkan di rak kiri (1 sensor untuk setiap tingkat rak). Tiga puluh unit termometer ditempatkan di ruang pengering belakang, 15 sensor suhu ditempatkan di rak kanan (3 sensor untuk setiap tingkat rak, depan, tengah, dan belakang), dan 15 sensor suhu ditempatkan di rak kiri (3 sensor untuk setiap tingkat rak,

depan, tengah dan belakang). Satu unit termometer ditempatkan di tempat teduh di sekitar alat pengering untuk mengamati suhu udara luar. Pengamatan dilakukan dengan selang waktu 10 menit dari awal tungku dinyalakan hingga suhu udara ruang pengering depan dan belakang mendekati suhu udara luar.

Dari data suhu dan kecepatan udara pengering, entalpi udara pengering, debit udara kering, panas sesaat, dan panas kumulatif dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$h = c_p (t - t_a) \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- h = Entalpi udara panas (kJ/kg)
- $c_p$  = Panas sfesifik udara ( $1000 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ )
- t = Suhu udara pengering ( $^\circ\text{C}$ )
- $t_a$  = Udara luar ( $^\circ\text{C}$ ) (sebagai acuan)

$$D = \rho v A \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

- D = Debit udara pengering (kg/s)
- $\rho$  = Kerapatan berat udara ( $1,293 \text{ kg/m}^3$ )
- v = Kecepatan aliran udara dalam cerobong
- A = Luas penampang cerobong ( $0,25 \text{ m}^2$  untuk cerobong ruang pengering depan dan  $0,046 \text{ m}^2$  untuk ruang cerobong uang pengering belakang).

$$Q = D c_p \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

- Q = Panas bermanfaat sesaat, J atau MJ (panas yang digunakan untuk menaikkan suhu udara di dalam ruang pengering).

$$Q_c = \sum_1^n Q \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

- $Q_c$  = Panas kumulatif, J atau MJ dan n adaah jumlah interval pengamatan.

Ketika pengamatan selesai tetapi suhu ruang pengering depan, ruang pengering belakang, dan penukar panas

masih lebih tinggi dari suhu sekitar maka panas yang disimpan oleh bagian ini dihitung sebagai berikut:

$$Q_w = W_w cp_w (t_w - t_a) \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

- $Q_w$  = Panas yang tersimpan dalam air (J)
- $W_w$  = Berat air dalam penyimpanan panas (kg)
- $cp_w$  = Panas spesifik air (4180 kJ/kg °C)
- $t_w$  = Suhu air (°C).

$$Q_f = W_f cp (t_f - t_a) \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

- $Q_f$  = Panas tersimpan dalam udara ruang pengering depan (J)
- $W_f$  = Berat udara (kg)
- $t_f$  = Suhu akhir udara akhir, di ruang pengering depan (°C).

$$Q_r = W_r cp (t_r - t_a) \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

- $Q_r$  = Panas tersimpan dalam udara, ruang pengering belakang (J)
- $W_r$  = Berat udara (kg)
- $t_r$  = Suhu akhir udara di ruang pengering belakang (°C).

Dengan demikian panas potensial dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_{pf} = Q_{cf} + Q_w + Q_f \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

- $Q_{pf}$  = Panas potensial (J)
- $Q_{cf}$  = Panas kumulatif (J) ruang pengering depan.

$$Q_{pr} = Q_{cr} + Q_r \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

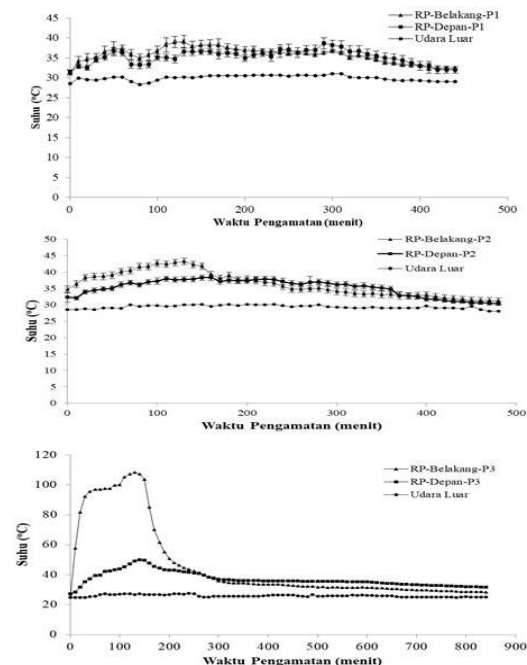
- $Q_{pr}$  = Panas potensial, J,
- $Q_{cr}$  = Panas kumulatif, J dari ruang pengering belakang

Data suhu, kecepatan, entalpi, dan panas kumulatif dari percobaan pertama disajikan dalam bentuk kurva fungsi waktu pengamatan sedangkan data suhu maksimum dan waktu pembakaran dari

percobaan kedua disajikan dalam bentuk grafik fungsi pasokan bahan bakar kayu.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

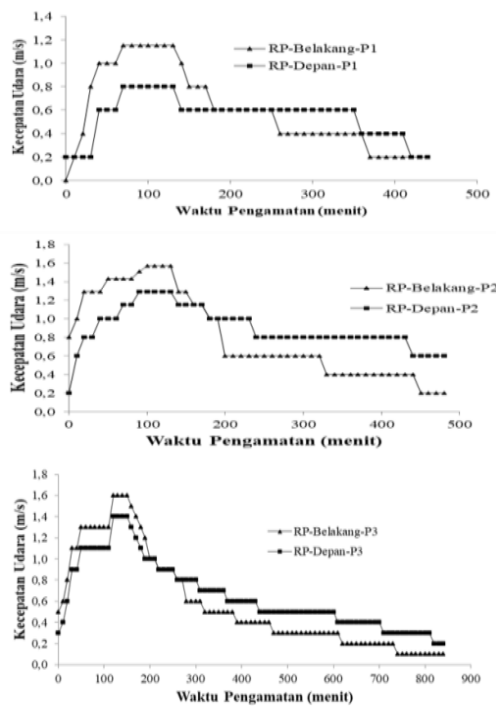
Profil suhu ruang pengering depan dan belakang hasil percobaan pertama diperlihatkan pada Gambar 4. Ketika pasokan LPG dinaikkan dari P1 (1,4 kg/jam) ke P2 (2,3 kg/jam) dan ke P3 (4,35 kg/jam) dari mulai saat tungku dinyalakan sampai api padam suhu udara pengering rata-rata meningkat 36,5°C, 38,3°C, dan 50,1°C untuk ruang pengering depan dan 39°C, 43,2°C, dan 108,4°C untuk ruang pengering belakang.



Gambar 4. Profil Suhu Ruang Pengering Depan dan Belakang Dengan Tiga Pengaturan Pasokan LPG

Suhu rata-rata ruang pengering belakang secara konsisten lebih tinggi dari suhu ruang pengering depan dan semakin tinggi pasokan LPG semakin tinggi perbedaan suhu tersebut, yang menunjukkan bahwa semakin besar jumlah panas yang dipindahkan ke ruang pengering belakang. Hal ini terjadi semua panas yang dipasok ke ruang dipakai untuk memanaskan udara di ruang pengering ini sedangkan sebagian besar panas hasil

pembakaran bahan bakar tersimpan di penyimpanan/penukar panas dapat memanaskan ruang pengering setelah pembakaran bahan bakar dihentikan, panas yang tersimpan, sebagai contoh kalau tungku dinyalakan dari pukul 09–16, maka sampai hari berikutnya suhu udara ruang pengering depan masih jauh lebih tinggi dari suhu udara luar (panas yg tersimpan belum habis). Suhu udara pengering di kedua ruang pengering tetap lebih tinggi dari suhu udara luar hingga masing-masing 7,3 jam, 8 jam, dan 14 jam untuk pasokan LPG P1, P2 dan P3. Sangat menarik untuk dicatat bahwa panas yang dilepaskan kembali dari alat penukar panas ke tungku ketika suhu udara di dalam tungku lebih rendah dari penukar panas cukup untuk mempertahankan kenaikan suhu di ruang pengering belakang.

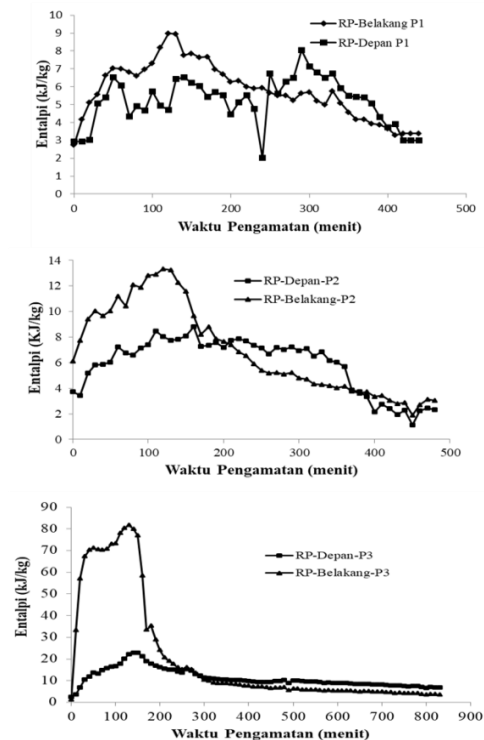


Gambar 5. Profil Kecepatan Udara Ruang Pengering Depan dan Belakang Dengan Tiga Pengaturan Pasokan LPG

Profil kecepatan udara ruang pengering depan dan belakang hasil percobaan pertama disajikan pada Gambar 5. Dari gambar tersebut dapat diamati bahwa kecepatan udara pengering maksimum pada ruang pengering depan masing-masing adalah 0,80 m/s, 1,29 m/s, dan 1,4 m/s dan

ruang pengering belakang adalah 1,15 m/s, 1,57 m/s, dan 1,6 m/s masing-masing untuk pasokan LPG 1,4 kg/jam, 2,3 kg/jam, dan 4,35 kg/jam.

Fakta ini menunjukkan bahwa meskipun alat pengering tidak dilengkapi kipas untuk mensirkulasikan udara, kecepatan aliran udara dalam alat pengering masih berada dalam kisaran kecepatan udara pengering surya hibrid yang dilaporkan oleh beberapa peneliti, seperti pengering hibrid surya-biomassa tanpa beban, 0,6–1,35 m/s (Yassen *et al.*, 2022), pengering hibrid lorong surya-biomassa, 0,2–0,6 m/s (Chavan *et al.*, 2015), pengering hibrid rumah kaca surya-biomassa, 0,7 m/s (Ndirangu *et al.*, 2020) pengering hibrid surya-listrik aktif tidak langsung, 1–2 m/s (Boughali *et al.*, 2009). Peningkatan kecepatan udara pengering di ruang pengering belakang oleh peningkatan pasokan LPG dari 2,3 kg/jam menjadi 4,35 kg/jam yang cukup kecil menunjukkan adanya saturasi gradien kecepatan udara yang dikarenakan luas penampang cerobong ruang belakang relatif kecil dibandingkan dengan luas penampang cerobong ruang pengering depan.

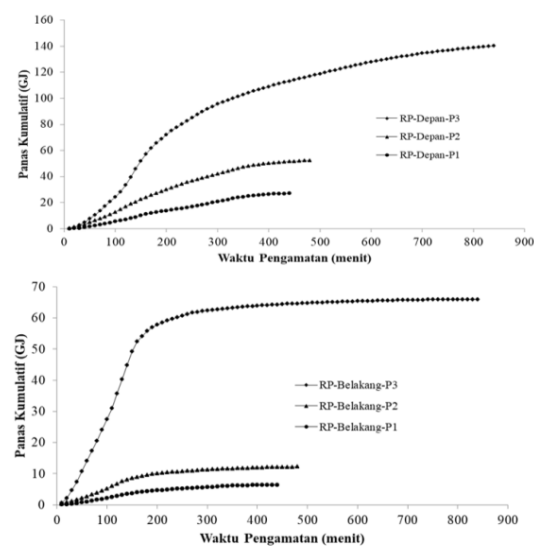


Gambar 6. Profil Entalpi Udara Ruang Pengering Depan dan Belakang dengan Tiga Pengaturan Pasokan LPG



Profil entalpi udara pengering dalam ruang pengering depan dan belakang hasil percobaan pertama disajikan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa sebelum kompor dimatikan, entalpi udara pengering dalam ruang pengering belakang lebih tinggi dari ruang pengering depan untuk semua pasokan LPG. Entalpi udara kering yang lebih tinggi ini menunjukkan potensinya untuk menyelesaikan proses pengeringan yang lebih cepat.

Perpotongan titik-titik pada grafik suhu, kecepatan udara, dan entalpi yang terlihat setelah kompor dimatikan menunjukkan kinerja alat penukar panas dalam memindahkan kembali panas yang tersimpan ke udara dalam ruang pengering depan sehingga suhu udara dalam ruang ini dapat dipertahankan sedangkan suhu udara ruang pengering belakang menurun meskipun tetap lebih tinggi dari suhu udara luar.



Gambar 7. Panas Kumulatif

Gambar 7 memperlihatkan panas kumulatif dalam ruang pengering depan dan belakang dihitung secara berurutan dari persamaan (2), (3) dan (4). Dari data gambar ini dapat dihitung bahwa total panas berguna didistribusikan di ruang pengering depan dan belakang dengan persentase 81%:19%, 81%:19% dan 68%:32 % masing-masing untuk pasokan LPG 1,4 kg/jam, 2,3 kg/jam, dan LPG 4,35 kg/jam. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar pasokan LPG maka semakin banyak panas dari

tungku yang dialirkan ke ruang pengering belakang.

Panas yang dikonversikan dari pembakaran LPG dalam bentuk panas tersimpan yang dihitung dengan rumus (5), (6) dan (7) dan panas potensial yang dihitung dengan rumus (8) dan (9) disajikan pada Tabel 1. Berdasarkan data pada tabel ini, panas yang dihasilkan dari pembakaran LPG 1,4 kg/jam, 2,3 kg/jam, dan 4,35 kg/jam, total potensi panasnya adalah 52,5% (47,7% didistribusikan di ruang pengering depan dan 4,8% di ruang pengering belakang), 51,8% (46,1% disalurkan di ruang pengering depan dan 5,7 % di ruang pengering belakang), dan 58,5% (42,5% disalurkan di ruang pengering depan dan 16% di ruang pengering belakang) Fakta ini menunjukkan bahwa semakin besar pasokan LPG maka semakin tinggi potensi panasnya. Total potensi panas dapat diartikan sebagai efisiensi tungku yang rata-rata mencapai 54,3%. Efisiensi tungku ini lebih tinggi dari efisiensi tungku biomassa yang dilaporkan oleh Ali *et al.* (2022), yaitu 52,3%.

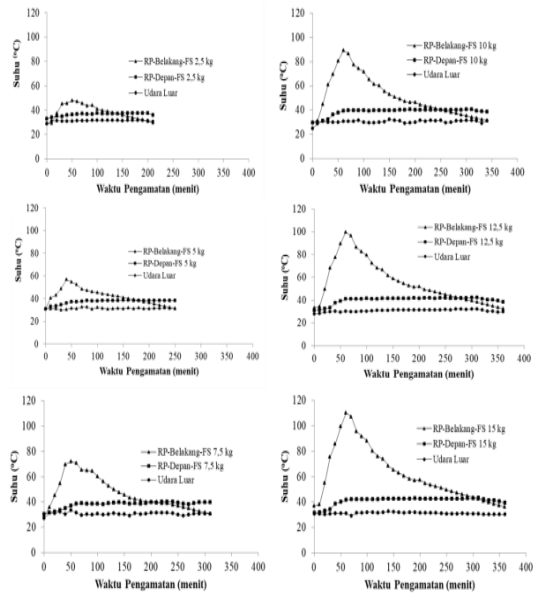
Tabel 1. Panas tersimpan dan panas potensial yang dihasilkan dari pembakaran LPG

Tipe Panas	Pasokan Gas P1 (1,4 kg/jam)		Pasokan Gas P2 (2,3 kg/jam)		Pasokan Gas P3 (4,35 kg/jam)	
	Gas	P1	Gas	P2	Gas	P3
$Q_{LPG}$ (J)	132358800	217446600	411257700			
$Q_{cf}$ (J)	27098306	52402575	140184733			
$Q_w$ (J)	35944343	47821604	34381545			
$Q_f$ (J)	31489	21938	64302			
$Q_{cr}$ (J)	6311719	12292079	65986838			
$Q_r$ (J)	29783	30295	29015			
$Q_{pf}$ (J)	63074138	100246117	174630580			

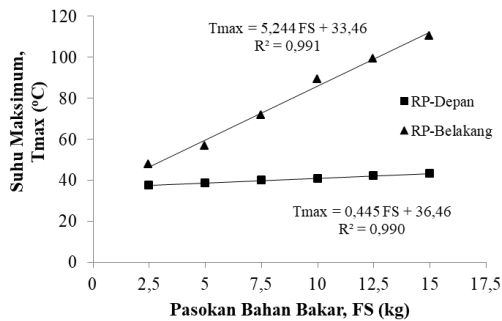
Gambar 8 menyajikan profil suhu ruang pengering depan dan belakang yang dihasilkan dari percobaan tahap kedua yakni pengoperasian alat pengering dengan berbagai pasokan kayu bakar ke dalam tungku dan menunjukkan bahwa setelah kayu bakar dibakar, suhu udara pengering di kedua ruang pengering tetap lebih tinggi dari suhu sekitar hingga 3,5 hingga 6 jam tergantung pada laju pasokan kayu bakar.

Gambar 9 dan 10 menunjukkan grafik hubungan antara suhu udara maksimum dalam kedua ruang pengering dan lama waktu nyala api dalam tungku dengan

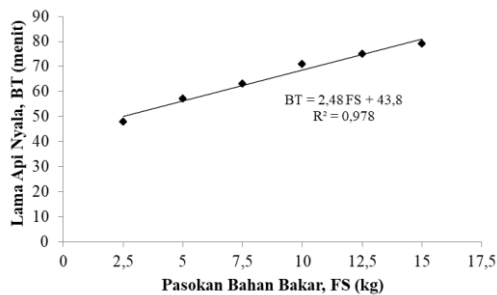
pasokan bahan bakar. Gambar 9 dan 10 menunjukkan bahwa suhu udara pengering maksimum dalam ruang pengering depan dan belakang meningkat secara linier dengan peningkatan pasokan kayu bakar.



Gambar 8. Profil Suhu Ruang Pengering Depan dan Belakang Ketika Alat Pengering Dioperasikan dengan Bahan Bakar Kayu



Gambar 9. Grafik Hubungan Antara Suhu Maksimum dengan Pasokan Bahan Bakar Kayu



Gambar 10. Grafik Hubungan Antara Lama Api Nyala dengan Pasokan Bahan Bakar

Berdasarkan persamaan pada Gambar 9,  $T_{max} = 5,244 FS + 33,46$  maka untuk menghasilkan suhu maksimum alat pengering rumah kaca Widyotomo, 52°C (Widyotomo, 2014), alat pengering tipe box Gachen, 40°C (Gachen *et al.*, 2020), pengering hibrid panas surya-biomassa tipe box Agustina dan Syah, 55°C (Agustina *et al.*, 2016, Syah *et al.*, 2016), pengering cabinet hibrid surya-pemanas gas solar Suherman, 60°C (Suherman *et al.*, 2020), dan suhu pengeringan maksimum untuk pengeringan mekanis kopi Robusta yang ditentukan oleh Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 100°C (Mentan RI, 2012), membutuhkan pasokan kayu bakar sebanyak 3,54 kg, 1,25 kg, 4,10 kg, 5,06 kg, dan 12,69 kg. Selanjutnya dari persamaan pada Gambar 10,  $BT = 2,48 FS + 43,8$ , lama nyala api (waktu pembakaran) kayu bakar yang sesuai untuk alat-alat pengering tersebut berturut-turut adalah 52,58 menit, 46,9 menit, 53,97 menit, 56,35 menit, dan 75,27 menit. Waktu pembakaran ini menandakan kapan pasokan bahan bakar kayu (umpan tungku) susulan harus dilakukan.

## SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian di atas, disimpulkan bahwa suhu udara pengering di kedua ruang pengering tetap lebih tinggi dibandingkan suhu udara ambien hingga 7,3 jam hingga 14 jam. Sampai tungku dimatikan, dengan bertambahnya suplai LPG, suhu udara pengering rata-rata meningkat dari suhu udara ambien menjadi 36,5°C menjadi 50,1°C untuk ruang pengering depan dan 39°C menjadi 108°C untuk ruang pengering belakang. Kecepatan udara pengeringan maksimum masing-masing adalah 0,8 m/s hingga 1,4 m/s dan 1,15 m/s hingga 1,6 m/s untuk ruang pengering depan dan ruang pengering belakang. Entalpi udara pengering di ruang pengering belakang secara konsisten lebih tinggi daripada di ruang pengering depan. Dengan peningkatan pasokan LPG, persentase panas kumulatif yang didistribusikan di ruang pengering belakang meningkat dari 19% menjadi 32% sedangkan potensi panasnya adalah 51,8% hingga 58,5% dari

nilai kalor LPG yang dipasok dan didistribusikan 42,5% hingga 47,7% pada ruang jemur depan dan 4,8% sampai 16% di ruang jemur belakang. Memasok tungku dengan 2,5 kg hingga 15 kg kayu bakar, suhu udara pengeringan maksimum di kedua ruang pengering dan waktu pembakaran meningkat secara linier dengan pasokan kayu bakar. Suhu udara kedua ruang pengering dipertahankan lebih tinggi dari suhu sekitar dari 3,5 jam hingga 6 jam. Mengoperasikan mesin pengering dengan suplai kayu bakar sebanyak 3,54 kg hingga 12,69 kg menghasilkan temperatur udara pengering ruang pengering belakang yang dapat disesuaikan dengan temperatur udara pengering berbagai pengering kopi mulai dari pengering matahari, pengering hibrid, dan pengering mekanik.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia atas dukungan pembiayaan sebagaimana tertuang dalam kontrak perjanjian nomor 106/E4.1/AK.04.PT/2021 dan 2180/UN30.15 /PG/2021.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Y, -M., Aziz, G, -S., 2020. The distribution of solar radiation and solar energy intensity, and top locations for constructing solar energy stations in Iraq. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 10(6), 2465-2471. <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.10.6.12769>
- Abuşka, -M., Şevik, -S., 2017. Energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses of flat-plate and V-groove solar air collectors based on aluminium and copper. *Solar Energy*. 158, 259-277. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.045>
- Acar, -B., Dağdeviren, -A., Özkaymak, -M., 2020. Design of hazelnut drying system supported by solar energy, investigation of drying performance and determination of proper drying model. *International Journal of Renewable Energy Research*. 5(2), 570-577. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v10i2.10620.g7926>
- Agustina, -R., Syah, -H., Moulana, -R., 2016. Characteristic of coffee beans box dryer with heat source of coffee husk furnace and a solar collector. *Jurnal Ilmiah Teknologi Pertanian Agrotechno*. 1(1), 20-27. <https://ojs.unud.ac.id/index.php/agrotechno/article/view/22016>
- Al-Damook, -M., Obaid, Z, A, -H., Al Qubeissi, -M., Dixon-Hardy, -D., Cottom, -J., Heggs, P, -J., 2019. CFD modeling and performance evaluation of multipass solar air heaters. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 76(6), 438-464. <https://doi.org/10.1080/10407782.2019.1637228>
- Ali, -A., Iqbal, -T., Cheema, M, J, -M., Afzal, -A., Yasin, -M., Haq, -Z., Malik, A, -M., Khan, K, -S., 2021. Development of a low-cost biomass furnace for greenhouse heating. *Sustainability*. 13(9), 1-16. <https://doi.org/10.3390/su13095152>
- Almuhanna, E, -A., 2012. Utilization of a solar greenhouse as a solar dryer for drying dates under the climatic conditions of the Eastern Province of Saudi Arabia. *Journal of Agricultural Science*. 4(3), 237-246. <https://doi.org/10.5539/jas.v4n3p237>
- Anuwar, F, -H., Omar, A, -M., 2016. Future solar irradiance prediction using least square support vector machine. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 6(4), 520-523. <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.6.4.899>
- Arun, -S., Ayyappan, -S., Sreenarayanan, V, -V., 2014. Experimental studies on drying characteristics of tomato in a solar tunnel greenhouse dryer. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 3(4), 32-37.

- <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v3i4/D1206093414.pdf>
- Arya, -F., Hyde, -T., Henshall, -P., Eames, -P., Moss, -R., Shire, -S., Uhomoihi, -J., 2021. Fabrication analysis of flat vacuum enclosures for solar collectors sealed with Cerasolzer 217. *Solar Energy*. 220, 635-649. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.040>
- Azimi, -A., Tavakoli, -T., Beheshti, H, -K., Rahimi, -A., 2012. Experimental study on eggplant drying by an indirect solar dryer and open sun drying. *Iranica Journal of Energy & Environment*. 3(4), 348-354. <https://doi.org/10.5829/idosi.ijee.2012.03.04.09>
- Aziz, -A., Rehman, S, -U., Rehman, S, -U., 2016. Exergy analysis of solar cabinet dryer and evaluate the performance enhancement of solar cabinet dryer by addition of solar reflectors. *International Journal of Renewable Energy Research*. 6(4), 1393-1402. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v6i4.4576.g6928>
- Banout, -J., Ehl, -P., 2010. Using a double-pass solar drier for drying of bamboo shoots. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*. 111(2), 119-127. <https://www.jarts.info/index.php/jarts/article/view/2011072538416/128>
- Boughali, -S., Benmoussa, -H., Bouchekima, -B., Mennouche, -D., Bouquettaia, -H., Bechki, -D., 2009. Crop drying by indirect active hybrid solar-electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara. *Solar Energy*. 83(12), 2223-2232. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.09.006>
- Cabral, -D., Gomes, -J., Hayati, -A., Karlsson, -B., 2021. Experimental investigation of a CPVT collector coupled with a wedge PVT receiver. *Solar Energy*. 215, 335-345. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.038>
- Chavan, B, -R., Yakupitiyage, -A., Kumar, -S., Sutar, V, -B., 2015. Effect of drying in solar-biomass hybrid tunnel dryer on biochemical, microbial and sensory properties of mackerel. *International Journal of Food and Fermentation Technology*. 5(2), 201-211. <https://doi.org/10.5958/2277-9396.2016.00010.6>
- Dhanuskodi, -S., Sukumaran, -R., Wilson, V, -H., 2013. Investigation of solar biomass hybrid system for drying cashew. *International Journal of ChemTech Research*. 5(2), 1076-1082. [https://sphinxsai.com/2013/conf/PDFS%20ICGSEE%202013/CT=76\(1076-1082\)ICGSEE.pdf](https://sphinxsai.com/2013/conf/PDFS%20ICGSEE%202013/CT=76(1076-1082)ICGSEE.pdf)
- Dhanushkodi, -S., Wilson, V, -H., Sudhakar, -K. 2015. Simulation of solar biomass hybrid dryer for drying cashew kernel. *Advances in Applied Science Research*. 6(8), 148-154. <https://www.primescholars.com/articles/simulation-of-solar-biomass-hybrid-dryer-for-drying-cashew-kernel.pdf>
- Dirjenmigas. 2011. *Konversi mitan ke GAS*. <https://migas.esdm.go.id/uploads/Konversi-Mitan-GAS.pdf>
- Ferreira, A, -G., Charbel, A, L, -T., Pires, R, -L., Silva, J, -G., Maia, C, -B., 2007. Experimental analysis of a hybrid dryer. *Engenharia Termica*. 6, 3-7. <http://dx.doi.org/10.5380/reterm.v6i2.61680>
- Gachen, -A., Hirpersa, -Z., Woyessa, L, -N. 2020. Design and construction of indirect solar coffee dryer. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 9(4), 2943-2956. <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v9i4/D2004029420.pdf>
- Grigoriev, -V., Milidonis, -K., Blanco, -M. 2020. Sun tracking by heliostats with arbitrary orientation of primary and secondary axes. *Solar Energy*. 207, 1384-1389. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.07.086>
- Gunasekaran, -K., Shanmugam, -V., Suresh, -P. 2012. Modeling and analytical experimental study of hybrid solar dryer integrated with biomass dryer for drying coleus forskohlii stems.

- IPCSIT. 28, 28-32.  
<http://www.ipcsit.com/vol28/006-CoimbatoreConferences-P0011.pdf>
- Jarvela, -M., Lappalainen, -K., Valkealahti, -S., 2020. Characteristics of the cloud enhancement phenomenon and PV power plants. *Solar Energy*. 196, 137-145.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.090>
- Kementrian Pertanian R. I., 2012. *Lampiran Peraturan Menteri Pertanian Nomor 52/Permentan/OT.140/9/2012. Pedoman penanganan pasca panen kopi*. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/160186/permentan-no-52permentanot14092012-tahun-2012>
- Kishk, S, -S., El-Gamal, R, -A., El Masry, G, -M. 2019. Effectiveness of recyclable aluminum cans in fabricating an efficient solar collector for drying agricultural products. *Renewable Energy*. 33, 307-316.  
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.028>
- Kusmiyati., Fudholi, -A. 2021. Solar-assisted microwave convective dryer for coffee cherries. *International Journal of Renewable Energy Research*. 11(1), 407-415.  
<https://doi.org/10.20508/ijrer.v11i1.11686.g8152>,
- Lorenz, -E., Guthke, -P., Dittmann, -A., Holland, -N., Herzberg, -W., Karalus, -S., Muller, -B., Braun, -C., Heydenreich, -W., Saint-Drenan, -Y., 2022. High resolution measurement network of global horizontal and tilted solar irradiance in southern Germany with a new quality control scheme. *Solar Energy*. 231, 593-606.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.023>
- Maia, C, -B., Ferreira, A, -G., Caberas-Gomez, -L., Hanriot, S, -M., Martin, T, -O., 2012. Simulation of the airflow inside a hybrid dryer. *International Journal of Recent Research and Applied Studies*. 10(3), 382-389.  
<https://sig.cefetmg.br/sigaa/verProducao?idProducao=4955446&key=41cdbc3e92cb66e56d6cf7905ed1dbbe>
- Matsunobu, L, -M., Pedro, H, T, -C., Coimbra, C, F, -M., 2021. Cloud detection using convolutional neural networks on remote sensing images. *Solar Energy*. 230, 1020-1032.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.065>
- Montes, M, -J., Linares, J, -I., Barbero, -R., Rovira, -A., 2020. Proposal of a new design of source heat exchanger for the technical feasibility of solar thermal plants coupled to supercritical power cycles. *Solar Energy*. 211, 1027-1041.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.042>
- Mortezapour, -H., Ghobadian, -B., Khoshtagaza, M, -H., Minaei, -S., 2014. Drying kinetics and quality characteristics of saffron dried with a heat pump assisted hybrid photovoltaic-thermal solar dryer. *Journal of Agriculture, Science and Technology*. 16, 33-45.  
<https://jast.modares.ac.ir/article-23-1568-en.pdf>
- Munir, -A., Sultan, -U., Iqbal, -M. 2013. Development and performance evaluation of a locally fabricated portable solar tunnel dryer for drying of fruits, vegetables and medicinal plants. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*. 50(3), 493-498.  
<https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20133426682>
- Munkhammar, -J., Meer, D, V, -D., Widen, -J., 2019. Probabilistic forecasting of high-resolution clear-sky index time-series using a Markov-chain mixture distribution model. *Solar Energy*. 184, 688-695.  
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.04.014>
- Murali, -G., Sundari, A, T, -M., Raviteja, -S., Chanukyachakravarthi, -S., Tejpraneeth, -M., 2020. Experimental study of thermal performance of solar aluminium cane air heater with and without fins. *Materialstoday: Proceedings*. 21, 223-230.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.224>
- Nandwani, S, -S., 2011. Design construction and study of direct indirect natural circulation solar dryer in Costa Rica.

- ISIESCO Science and Technology Vision*. 7(11), 43-47.
- Ndirangu, S, -N., Ronoh, E, -K., Kanali, C, -L., Mutwiwaand, U, -N., Kituu, G, -M., 2020. Design and performance evaluation of a solar-biomass greenhouse dryer for drying of selected crops in western Kenya. *CIGR Journal*. 22(3), 219-229. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/5644>
- Nguyen, H, -B., Bui, T, -A., 2016. Developing the solar tracking system for trough solar concentrator. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 6(1), 58-60. <https://core.ac.uk/reader/296919200>
- Nguyen, H, -B., Nguyen, -H., Ha, V, -N., Duong, C, -T., 2013. A Study on a Model of Anchovy Solar. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*. 3(3), 5-8. <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.3.3.319>
- Olorok, J, -O., Omojowo, F, -S. 2009. Adaptation and improvement of a simple solar tent dryer to enhance fish drying. *Nature and Science*. 7(10), 18-24. [https://www.sciencepub.net/nature/ns0710/03\\_1120\\_Solar\\_Tent\\_ns0710.pdf](https://www.sciencepub.net/nature/ns0710/03_1120_Solar_Tent_ns0710.pdf)
- Osei, -M., Staveland, -O., McGowan, -S., Unger, J, -B., Christler, -N., Weeman, -M., Strutz, M, -E., Walker, -M., Maun, M, -B., Dunning, N, -C., Bekheit, M, -M., Abraham, J, C, -P., Cox, -L., Gius, -G., Hansel, -O., Amofo, E, -O., Hugo, -N., Schwartz, -P., 2021. Phase change thermal storage: Cooking with more power and versatility. *Solar Energy*, 220. 1065-1073. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.040>
- Panchal, -S., Solanki, S, -K., Yadav, -S., Tilkar, A, -K., Nagaich, R. 2013. Design, construction and Testing of solar dryer with roughened surface solar air heater. *International Journal of innovative Research in Engineering and Science*. 7(2), 7-17. <https://doi.org/10.12691/ajer-5-1-2>
- Parikh, -D., Agrawal, G, -D. 2011. Solar drying in hot and dry climate of Jaipur, India. *International Journal Of Renewable Energy Research*. 1(4), 224-231. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v1i4.67.g59>
- Prakash, T, -B., Satyanayarana, -S. 2014. Performance analysis of solar drying system for Guntur Chili. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology*. 4(2), 283-298. <https://ijltet.org/wp-content/uploads/2014/08/38.pdf>
- Qin, -Y., Huang, -J., McVicar, T, -R., West, -S., Khan, -M., Steven, A, D, -L., 2021. Estimating surface solar irradiance from geostationary Himawari-8 over Australia: A physics-based method with calibration. *Solar Energy*. 220, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.029>
- Quitiaquez, -W., Estupinan-Campos, -J., Nieto-Londono, -C., Isaza-Roldan, C, -A. Quitiaquez, -P., Toapanta-Ramos, -F., 2021. CFD analysis of heat transfer enhancement in a flat-plate solar collector with different geometric variations in the superficial section. *International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology*. 11(5), 2039-2045. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.5.15288>
- Rasmussen, -C., Frolke, -L., Bacher, -P., Madsen, -H., Rode, -C. 2020. Semi-parametric modelling of sun position dependent solar gain using B-splines in grey-box models. *Solar Energy*. 195, 1384-1389. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.023>
- Reyes, -A., Cubillos, -F., Mahn, -A., Vasques, -J., 2014. Dehydration of agro products in a hybrid solar dryer controlled through a fuzzy logic system. *International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application*. 3, 66-70. <https://doi.org/10.4236/ijmnta.2014.33009>

- Rodriguez, E, -C., Fiuroa, I, -P., Mercado, C, A, -R., 2013. Feasibility analysis of drying process habanero chili using a hybrid-solar-fluidized bed dryer in Yucatan Mexico. *Journal of Energy and Power Engineering*. 7, 1898-1908. <https://www.davidpublisher.com/Public/uploads/Contribute/562839000970f.pdf>
- Sajith, K, -G., Muraleedharan, -C. 2013. A study on drying of amla using a hybrid dryer. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2(1), 794-799. [https://www.ijirset.com/upload/2013/special/energy/52\\_A-STUDY.pdf](https://www.ijirset.com/upload/2013/special/energy/52_A-STUDY.pdf)
- Sajith, K, -G., Muraleedharan, -C., 2014. Economic analysis of hybrid photo voltaic/thermal solar dryer for drying amla. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 3(8), 907-910. <https://www.ijert.org/research/economic-analysis-of-a-hybrid-photovoltaicthermal-solar-dryer-for-drying-amlai-IJERTV3IS080635.pdf>
- Saravanan, -D., Wilson, V, -H., Kumarasamy, -S. 2014. Design and thermal performace of the solar biomass hybrid dryer for cashew drying. *Mechanical Engineering*. 12, 277-288. <http://casopisi.junis.ni.ac.rs/index.php/FUMechEng/article/view/564/270>
- Sontakke, M, -S., Salve, S, -P. 2015. Solar drying technologies: A review. *International Refereed Journal of Engineering and Science*. 4(4), 29-35. <https://www.irjes.com/Papers/vol4-issue4/E442935.pdf>
- Suherman, -S., Widuri, -H., Patricia, -S., Susanto, E, -E., Sutrisna, R, -J. 2020. Energy analysis of a hybrid solar dryer for drying coffee beans. *International Journal of Renewable Energy Development*. 9(1), 131-139. <https://doi.org/10.14710/ijred.9.1.131-139>
- Sulaiman, -F., Abdullah, -N., Aliasak, -Z., 2013. Solar drying system for drying empty bunches. *Journal of Physical Science*. 24(1), 75-93. <https://jps.usm.my/wp-content/uploads/2014/10/24.1.7.pdf>
- Syah, -H., Agustina, -R., Moulana, -R. 2016. Rancang bangun pengering surya tipe bak untuk biji kopi. *Jurnal Rona Teknik Pertanian*. 9(1), 25-39. <https://jurnal.usk.ac.id/RTP/article/download/4382/3765>
- Thanaraj, -T., Dharmasena, D, A, -N., Samarajeewa, -U., 2004. Development of rotary solar hybrid dryer for small scale copra processing. *Tropical Agricultural Research*. 16, 305-315. [http://www.pgia.ac.lk/files/Annual\\_congress/journal/v16/DevelopmentRotary.pdf](http://www.pgia.ac.lk/files/Annual_congress/journal/v16/DevelopmentRotary.pdf)
- Too, Y, C, -S., Kim, -J., Kuruneru, S, T, -W., Stiff, -R., Dawson, -A., 2021. Development of a staged particle heat exchanger for particle thermal energy storage systems. *Solar Energy*. 220, 111-118. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.014>
- Tschopp, -D., Jensen, A, -R., Dragsted, -J., Ohnewenin, -P., Furbo, -S., 2022. Measurement and modeling of diffuse irradiance masking on tilted planes for solar engineering applications. *Solar Energy*. 231, 365-378. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.10.083>
- Urraca, -R., Sanz-Garcia, -A., Sanz-Garcia, -I., 2020. BQC: A free web service to quality control solar irradiance measurements across Europe. *Solar Energy*. 211, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.09.055>
- Wang, -Y., Millstein, -D., Mills, A, -D., Jeong, -S., Ancell, -A., 2022. The cost of day-ahead solar forecasting errors in the United States. *Solar Energy*. 231, 846-856. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.12.012>
- Widyotomo, -S., 2014. Kinerja bangunan tembus cahaya skala besar untuk proses pengeringan kopi. *Pelita Perkebunan*. 30(3), 240-257.

- <https://media.neliti.com/media/publications/159745-ID-none.pdf>
- Yassen, T, -A., Al-Kayiem, H, -H., Habib, -K., 2014. Evaluation of hybrid solar - biomass dryer with no load. *MATEC Web of Conferences, 13, ICPER 2014 - 4<sup>th</sup> International Conference on Production, Energy and Reliability.* 1-5. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20141306007>
- Yuwana, -Y., Sidebang, -B. 2017. Performative improvement of solar-biomass hybrid dryer for fish drying. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology.* 7(6), 2251-2257. <http://dx.doi.org/10.18517/ijaseit.7.6.1854>